



TUGAS AKHIR TF-141581

**STUDI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
ANGIN VERTIKAL AKSIS JENIS DARRIEUS
J-SHAPE MENGGUNAKAN WIND TUNNEL**

NATSIR HIDAYAT PRATOMO
NRP. 2413 100 080

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT TF-141581

***EXPERIMENTAL STUDY ON THE
PERFORMANCE OF VERTICAL AXIS WIND
TURBINE J-SHAPE DARRIEUS USING WIND
TUNNEL***

NATSIR HIDAYAT PRATOMO
NRP. 2413 100 080

Supervisor
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

LEMBAR BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Natsir Hidayat Pratomo

NRP : 2413100080

Departemen : Teknik Fisika FTI – ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul

”Studi Eksperimental Kinerja Turbin Angin Vertikal Aksis Jenis Darrieus J-Shape Menggunakan *Wind Tunnel*”

adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar - benarnya.

Surabaya, 6 Juli 2017
Yang membuat pernyataan



Natsir Hidayat Pratomo
NRP. 2413 100 080

**STUDI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
ANGIN VERTIKAL AKSIS JENIS DARRIEUS
J-SHAPE MENGGUNAKAN WIND TUNNEL**

TUGAS AKHIR

Oleh:
NATSIR HIDAYAT PRATOMO
NRP: 2413 100 080

Surabaya, 7 Juli 2017
Mengetahui/Menyetujui

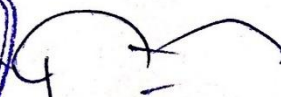
Pembimbing I,



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
NIPN. 19761223 200501 1 001

**Ketua Departemen
Teknik Fisika**




Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

**STUDI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN
ANGIN VERTIKAL AKSIS JENIS DARRIEUS J-
SHAPE MENGGUNAKAN WIND TUNNEL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NATSIR HIDAYAT PRATOMO
NRP. 2413 100 080

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Ir. Roekmono, M.T. (Penguji I)
3. Ir. Harsono Hadi M.T., Ph.D. (Penguji II)

SURABAYA
JUNI 2017

STUDI EKSPERIMENTAL KINERJA TURBIN ANGIN VERTIKAL AKSIS JENIS DARRIEUS J-SHAPE MENGGUNAKAN WIND TUNNEL

Nama : Natsir Hidayat Pratomo
NRP : 2413 100 080
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Abstrak

Penelitian turbin angin vertikal dengan turbin jenis baru J – darrieus pada *wind tunnel* menggunakan *airfoil* Du06w200 dengan panjang *chord* 2,7 cm. J – darrieus dipilih untuk meningkatkan performa turbin pada kecepatan angin rendah. Pengambilan beberapa besaran fisis seperti kecepatan sudut dan torsi sebagai parameter performansi turbin angin untuk melihat variasi turbin yang terbaik. Desain turbin pada *wind tunnel* diperkecil dengan perbandingan menggunakan perhitungan kesamaan dimensi. Parameter desain meliputi jenis *airfoil*, bentuk rotor, jumlah *blade*. Variasi yang digunakan adalah perbedaan jumlah *blade*, bentuk dari turbin dan kecepatan angin pada *wind tunnel*, yaitu 2 – 10 m/s. Peningkatan *self start*, kecepatan sudut dan torsi terjadi pada J – darrieus. Pusaran pada model J – darrieus membuat gaya *drag* meningkat membuatnya cukup baik pada kecepatan rendah. Model terbaik terdapat pada bentuk 4 *blade* J–darrieus dengan peningkatan torsi sebesar 10,8%.

**Kata Kunci : Turbin angin vertikal, Darrieus,
J – Darrieus, Wind tunnel, Torsi, Kecepatan Sudut.**

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE J-SHAPE DARRIEUS USING WIND TUNNEL

Name : Natsir Hidayat Pratomo
NRP : 2413 100 080
Departement : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Abstract

This experimental study has been conducted on influence of vertical axis turbine at wind tunnel using Du06w200 airfoil that has chord length 2,7 cm. J – darrieus is chosen to get some advantage in low speed wind. Some physical data such as angular velocity and torque as vertikal axis turbine performance parameter to see which is best turbine configuration. Turbine design at wind tunnel smaller than the real one and it calculated by dimensional similarity. Design parameter include airfoil type and number of blade. Variation using different variables, number of blade(2,3 and 4 blades), type of blade (J-Darrieus, Darrieus, and Savonius) and wind speed inside win tunnel (2, 4, 6, 8, and 10 m/s). Improvement happen at self start, angular velocity, torque and performannce at J-Darrieus. This airfoil modification make turbulence inside the curve so drag force increase and make it far better at low wind speed instead of normal darrieus model. Best model in this experimental study is 4 blade J-Darrieus that has better performance in every test with torque increase around 10.8%.

***Keyword : Vertical Axis Wind Turbine, Darrieus,
J – Darrieus, Wind tunnel, Torque, Angular Velocity.***

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir “Studi Eksperimental Kinerja Turbin Angin Vertikal Aksis Jenis Darrieus J-Shape Menggunakan *Wind Tunnel*”

Selama melaksanakan Tugas Akhir dan penulisan laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D., selaku Ketua Departemen Teknik Fisika, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro M.T., selaku Dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, ilmu, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D., selaku KBM Energi serta kepala Laboraturium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah memberikan dukungannya kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya selama penulis menuntut ilmu di Departemen Teknik Fisika ITS.
6. Bapak Mardi dari PT. Marulin Maju Utama, selaku perusahaan manufaktur turbin.
7. Ayahanda Rohmat, Ibunda Sunarni, adik Sungsang Doddy Purwanto, dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan psikologis, motivasi dan terutama doa kepada penulis.

Apabila terdapat kekurangan, penulis memohon kritik dan saran demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, dan tambahan ilmu bagi banyak orang.

Surabaya, 7 Juni 2017

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ix
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR NOTASI.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Laporan	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Angin	5
2.2 Gaya <i>Lift</i> dan Gaya <i>Drag</i>	6
2.3 Turbin Darrieus	11
2.4 Turbin Savonius	13
2.5 Teori Betz.....	14
2.6 Bilangan Reynolds	16
2.7 Kesamaan Dimensi.....	17
2.8 <i>Internal flow</i> dan <i>external flow</i>	19
2.9 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>inviscid</i>	20
2.10 Aliran <i>Compressible</i> dan Aliran <i>Incompressible</i> ...	21
2.11 Wind Tunnel.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Studi Literatur dan Penyusunan Proposal	26
3.2 Penentuan Variabel.....	27
3.3 Desain Geometri Turbin	28
3.4 Pembuatan Rancang Bangun	29
3.5 Pengujian dan Pengambilan Data	30
BAB IV ANALISA DATA dan PEMBAHASAN	33
4.1 Hasil Uji <i>Self Start</i>	33
4.2 Analisa Uji Kecepatan Sudut.....	35

4.3	Analisa Torsi	38
4.4	Analisa Performansi Turbin.....	42
4.5	Pembahasan	44
BAB V PENUTUP		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA		49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Potensi Energi Angin (GWEC, 2014)	5
Gambar 2.2	Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (<i>lift</i> dan <i>drag</i>) (Munson, 2002)	7
Gambar 2.3	gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda (Munson, 2002)	8
Gambar 2.4	Gaya <i>lift</i> pada Turbin Vertikal Aksis (Lazauskas, 2012).....	11
Gambar 2.5	Turbin Darrieus (zamani 2016)	12
Gambar 2.6	Turbin Savonius (Munson, 2002).....	13
Gambar 2.7	Vektor Gaya Savonius (Munson, 2002)	14
Gambar 2.8	Grafik Potensi Turbin Angin.....	15
Gambar 2.9	Geometri (Munson, 2002)	16
Gambar 2.10	Ilustrasi Kesamaan Dimensi (PSU, 2014) ...	17
Gambar 2.11	Ilustrasi Kesamaan Kinematik	18
Gambar 2.12	Aliran Dalam Pipa (Cengel, 2006)	19
Gambar 2.13	<i>Wind tunnel</i> (NASA, 2004).....	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2	Test Section <i>Wind tunnel</i>	28
Gambar 3.3	Bentuk <i>airfoil</i> Du06w200.....	28
Gambar 3.4	bentuk J - Du06w200 (Zamani, 2016).....	29
Gambar 3.5	Anemometer.....	30
Gambar 3.6	Tachometer	31
Gambar 3.7	Ilustrasi Pengambilan Data.....	32
Gambar 4.1	Grafik Uji Kecepatan Sudut	35
Gambar 4.2	Grafik Kecepatan Sudut terhadap perubahan bentuk.....	36
Gambar 4.3	Grafik Kecepatan Sudut terhadap perubahan bentuk.....	38
Gambar 4.4	Grafik Torsi Turbin	39
Gambar 4.5	Grafik Torsi terhadap perubahan bentuk	40
Gambar 4.6	Grafik Torsi terhadap perubahan Jumlah <i>blade</i>	42

Gambar 4.7 Grafik Performansi43

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Turbin	30
Tabel 4.1 Uji Self Start	33
Tabel 4.2 Persentase pengaruh perubahan bentuk	34
Tabel 4.3 Persentase pengaruh perubahan jumlah <i>blade</i>	35
Tabel 4.4 Data Kecepatan Sudut.....	36
Tabel 4.5 Perbandingan Kecepatan Sudut pada Perubahan bentuk	37
Tabel 4.6 Perbandingan Kecepatan Sudut pada Perubahan Jumlah <i>Blade</i>	38
Tabel 4.7 Data Torsi	39
Tabel 4.8 Perbandingan Torsi Terhadap Perubahan Bentuk .	41
Tabel 4.9 Perbandingan Torsi Terhadap perubahan Jumlah <i>Blade</i>	41
Tabel 4.10 Data Performansi	43

DAFTAR NOTASI

A	luas sapuan turbin (m^2)
C	panjang <i>chord</i> (m)
C_p	coefficient of power
C_D	coefficient <i>drag</i>
C_L	coefficient of power
C_T	coefficient of torque
D	diameter turbin (m)
Dr	Gaya <i>Drag</i> (Nm)
dA	elemen luasan kecil
δ	sudut kemiringan <i>foil</i>
H	tinggi turbin (m)
H/R	perbandingan antara tinggi dan jari-jari turbin
L	gaya <i>lift</i> (Nm)
n	jumlah <i>foil</i>
η	efisiensi (%)
θ	sudut azimuth ($^\circ$)
p	tekanan (Pa)
ρ	massa jenis (kg/m^3)
P	daya mekanik turbin (Watt)
$P_{available}$	daya angin (Watt)
R	jari-jari turbin (m)
Re_{turbin}	Reynold number turbin
s	span (m)
τ	torsi (Nm^2)
τ_w	tegangan geser dinding (Pa)
σ	<i>solidity</i>
u	kecepatan arus air (m/s)
ν	viskositas kinematik dari fluida ($N.s/m^2$)
ω	kecepatan sudut turbin (rad/s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

VAWT jenis *wind turbine* yang mudah untuk dikembangkan. Secara umum dibagi menjadi dua tipe yaitu darrieus dan Savonius. Masing – masing memiliki kelebihan, pada Savonius memiliki kondisi *self start* yang baik dengan menggunakan gaya *drag*. Model darrieus memiliki perbedaan yaitu perlu tingginya nilai *self start* namun model ini efisiensi yang tinggi. Pemilihan *airfoil* yang tepat juga dapat meningkatkan performa dari VAWT. (Classes, 2006) Dari perbedaan dan kelebihan masing – masing jenis rotor ini dapat digabungkan. Kedua bentuk tersebut dapat dimodifikasi menjadi bentuk J dimana dengan menerapkan hal tersebut dapat mengurangi tekanan dari ketebalan terbesar hingga *trailing edge*. (Zamani, 2016). *Airfoil* dengan bentuk simetris seperti NACA 0018 tidak lebih baik dari bentuk yang asimetris (Maruyama, 2001).

Pada penelitian (Classes 2006) desain *airfoil* bernama Du06w200. Dalam konversi VAWT menjadi energi listrik, untuk mendapatkan energi yang optimal dibutuhkan turbin dengan efisiensi yang tinggi. Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan beberapa upaya untuk meningkatkan efisiensi turbin. Cara yang pertama adalah dengan menguji variasi *solidity*. *Solidity* berhubungan dengan luas sapuan turbin, dimana semakin besar luas sapuan turbin akan semakin besar gaya *lift*, dimana model darrieus turbin yang mengandalkan gaya *lift*. (Qing'an Li 2015) Pada penelitian ini berdasar pada beberapa penelitian sebelumnya untuk mendapatkan performa terbaik dari VAWT dengan modifikasi *airfoil* Du06w200 menjadi bentuk J. Dengan menggunakan kecepatan dan variasi jumlah *blade* dari penelitian (Danang, 2016). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi pengaruh jumlah dan konfigurasi sudut pada performansi dan kemampuan *self-start* sehingga memberikan konfigurasi yang terbaik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka permasalahan dalam melakukan penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah cara menentukan desain turbin darrieus bentuk J ?
2. Bagaimana kinerja turbin darrieus bentuk J pada percobaan *wind tunnel* ?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Turbin yang digunakan model darrieus bentuk J
2. Eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui performansi turbin menggunakan *wind tunnel*.
3. Variasi yang dilakukan dengan mengubah konfigurasi *blade* dari rentang dua hingga empat *blade*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui cara menentukan desain turbin darrieus bentuk J
2. Mengetahui kinerja turbin darrieus bentuk J pada percobaan *wind tunnel*

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun dari 5 bab dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya Tugas Akhir, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab II dijelaskan beberapa teori singkat yang mendasari tugas akhir ini. Beberapa teori singkat yang dijelaskan pada bab ini adalah sebagai berikut: energi angin, aliran internal eksternal, Teori turbin angin vertikal, dll.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III dijelaskan tentang tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir secara sistematis dan runtut, diantaranya studi literatur dan penyusunan proposal, studi literatur, penentuan geometri, fabrikasi / rancang bangun turbin, pengujian dan pengambilan data, analisis dan penyusunan laporan.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian awal bab IV, disajikan proses perolehan data-data beserta rumus yang digunakan. Berdasarkan pengambilan dan pengolahan data yang telah dilakukan dapat diketahui pengaruh perubahan bentuk dan perubahan jumlah *blade*. Data yang diambil berupa kecepatan sudut, torsi, dan C_p . Kemudian dianalisis dengan dasar – dasar yang telah dipelajari pada tinjauan pustaka.

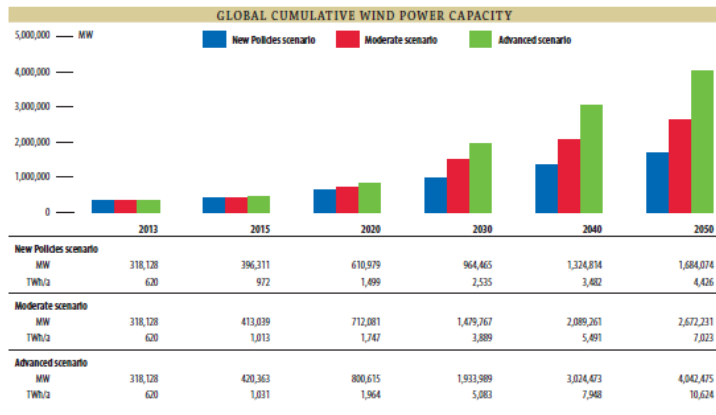
BAB V PENUTUP

Bab V merupakan bagian akhir dari bab utama dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Bab V berisikan kesimpulan yang menjawab tujuan tugas akhir serta saran yang diperlukan oleh peneliti. Dengan adanya saran ini, diharapkan penelitian selanjutnya dapat lebih baik dan mampu memberikan dampak yang besar terhadap perkembangan teknologi.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi merupakan suatu kekuatan yang dimiliki oleh suatu zat sehingga zat tersebut mempunyai pengaruh pada keadaan sekitarnya. Menurut mediumnya dikenal banyak jenis energi. Diantaranya, energi gelombang, energi arus laut, energi kosmos, energi yang terkandung pada senyawa atom, dan energi-energi lain yang bila dimanfaatkan akan berguna bagi kebutuhan manusia. Salah satu dari energi tersebut adalah energi angin yang jumlahnya tak terbatas dan banyak digunakan untuk meringankan kerja manusia. Angin memberikan energi gerak sehingga mampu menggerakkan perahu layar, kincir angin, dan bisa dimanfaatkan menjadi pembangkit listrik yaitu berupa turbin angin. Keberadaan energi angin ini terdapat di lapisan atmosfer bumi yang banyak mengandung partikel udara dan gas. Lapisan troposfer merupakan lapisan



Gambar 2.1 Potensi Energi Angin (GWEC, 2014)

atmosfer terendah bumi dan dilapisan ini semua peristiwa cuaca termasuk angin terjadi. Energi angin adalah energi yang terkandung pada massa udara yang bergerak. Energi angin berasal dari energi matahari. Pemanasan bumi oleh sinar matahari menyebabkan perbedaan massa jenis (ρ) udara. Perbedaan massa jenis ini menyebabkan perbedaan tekanan pada udara sehingga akan terjadi aliran fluida dan menghasilkan angin. Kondisi aliran angin dipengaruhi oleh medan atau permukaan bumi yang dilalui oleh aliran angin dan perbedaan temperatur permukaan bumi.

2.2 Gaya *Lift* dan Gaya *Drag*

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi. Efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan – tegangan geser dinding, τ_w , akibat efek viskos dan tegangan normal akibat tekanan, p . Distribusi tegangan geser dan tekanan ditunjukkan pada Gambar 2.2 (a) dan 2.2 (b). Baik τ_w dan p bervariasi besar dan arahnya disepanjang permukaan.

Seringkali berguna jika diketahui distribusi terperinci dari tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda, meskipun informasi tersebut sulit untuk didapatkan. Namun demikian, seringkali yang diperlukan hanya efek resultan secara keseluruhan. Gaya resultan dengan arah yang sama (sejajar) dengan kecepatan fluida disebut sebagai gaya hambat (*drag*), D_r , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan fluida disebut sebagai gaya angkat (*lift*), L , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (c). Untuk beberapa benda tiga dimensi, mungkin juga terdapat sebuah gaya samping yang tegak lurus terhadap bidang yang memuat D_r dan L .

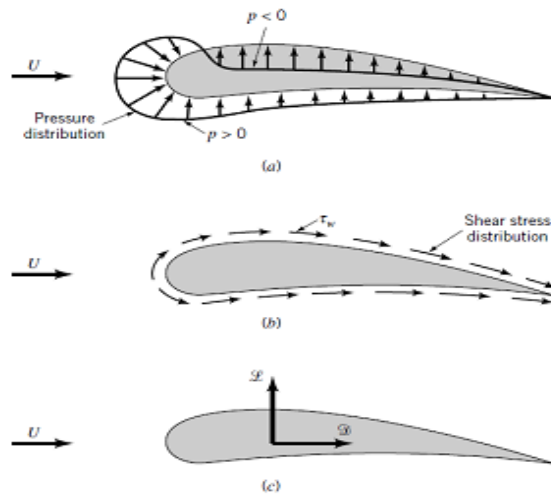
Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pengaruh-

pengaruh dari kedua besaran ini pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.3 Komponen x dan y dari gaya fluida pada elemen luas kecil sebesar dA adalah

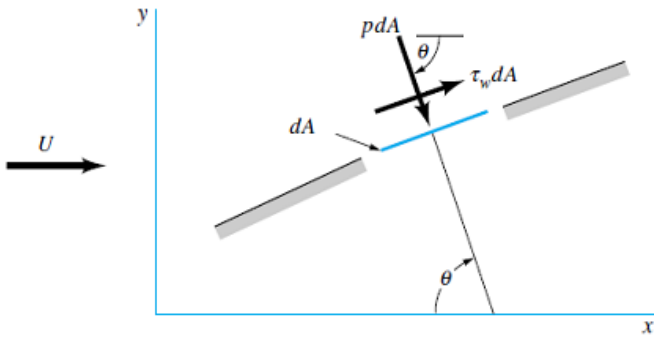
$$dF_x = (pdA) \cos\theta + (\tau_w dA) \sin\theta \quad (2.1)$$

dan

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA) \cos\theta \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) (Munson, 2002)



Gambar 2.3 gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda (Munson, 2002)

Jadi, komponen x dan y netto dari gaya pada benda adalah

$$D_r = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (2.3)$$

dan

$$L = \int dF_y = - \int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (2.4)$$

Tentu saja untuk melakukan pengintegralan dan menentukankan *lift* dan *drag*, harus diketahui terlebih dahulu bentuk benda (yaitu, θ sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi dari τ_w dan p di sepanjang permukaan. Distribusi – distribusi ini seringkali sangat sulit didapatkan, baik secara eksperimental maupun secara teoritis. Distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan dengan menggunakan serangkaian tap tekanan statis di sepanjang permukaan benda. Akan tetapi, sangat sulit untuk mengukur distribusi tegangan geser dinding.

Tegangan geser maupun tekanan sama-sama memberikan kontribusi terhadap *lift* dan *drag*, karena untuk sembarang benda θ tidak nol ataupun 90° pada benda. Pengecualian adalah pelat datar yang diatur baik sejajar terhadap aliran fluida ($\theta=90^\circ$) atau tegak lurus terhadap aliran fluida ($\theta=0$).

Meskipun persamaan 2.3 dan 2.4 berlaku untuk benda apapun, kesulitan dalam pemakaiannya terletak pada

bagaimana mendapatkan distribusi tegangan geser dan tekanan yang sesuai pada permukaan benda. Banyak sekali upaya telah dilakukan dalam menentukan besaran-besaran ini, tetapi karena berbagai kerumitan yang terlibat, informasi mengenai hal tersebut hanya tersedia untuk beberapa kondisi sederhana.

Tanpa informasi terperinci yang berkaitan dengan distribusi tegangan geser dan tekanan pada benda, persamaan 2.3 dan 2.4 tidak dapat digunakan. Alternatif yang banyak digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien *lift* dan *drag* yang tak berdimensi dan menentukan nilai-nilai perkiraannya dengan cara-cara tertentu, baik menggunakan analisis yang disederhanakan, atau dengan beberapa teknik numerik, atau eksperimen yang sesuai. *Koefisien lift*, C_L dan *koefisien drag*, C_D , didefinisikan sebagai (Munson, 2002) :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{D_r}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.6)$$

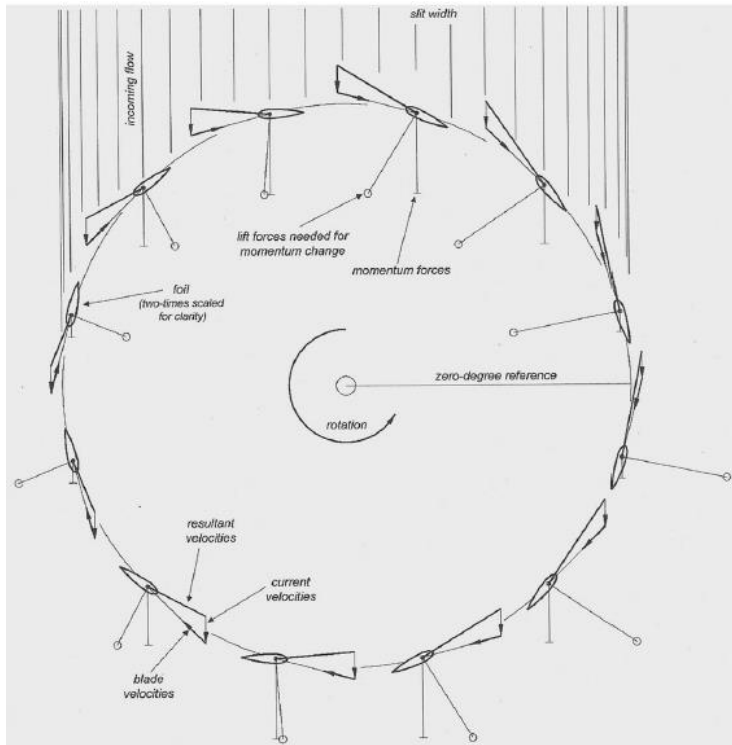
Ketika suatu benda padat ditempatkan dalam suatu aliran fluida akan dihasilkan gaya *lift*/angkat dan gaya *drag*/seret. Gaya *lift*/angkat dihasilkan oleh perubahan aliran disekitar foil. Gaya angkat terjadi ketika tekanan udara dibawah sayap/*airfoil* lebih tinggi daripada tekanan udara diatas sayap/*airfoil*. Fase ini menyebabkan perbedaan tekanan udara yang kemudian mengalir dari permukaan bawah sayap, sekitar ujung sayap menuju permukaan atas sayap. Gaya aerodinamis total pada umumnya terdiri dari dua komponen, yakni gaya angkat dan gaya seret. Didefinisikan bahwa komponen yang sejajar terhadap aliran adalah gaya dorong/*drag*, sedangkan komponen yang tegak lurus terhadap aliran adalah gaya angkat (Setiaji, 2011).

Setiap *foil* / *blade* turbin yang terkena aliran fluida akan mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*. Desain *foil* akan disesuaikan tergantung gaya manakah yang lebih banyak

dimanfaatkan. Berdasarkan cara kerjanya, turbin *Vertical Axis* dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *lift device* dan *drag device*. Turbin Darrieus dan Gorlov termasuk dalam turbin *lift device*. Sedangkan Turbin Savonius dan Turbin Hunter termasuk dalam turbin *drag device*.

Turbin tipe *drag device* memiliki *blade* berukuran lebar untuk menangkap arus. Turbin tipe ini menggunakan salah satu sisi *blade* (*blade* yang searah dengan arah arus) yang memiliki desain koefisien *drag* tinggi, sedangkan sisi yang lain (*blade* yang berlawanan dengan arah arus) digunakan *blade* dengan desain koefisien *drag* yang rendah. Dengan cara ini gaya dorong / gaya *drag* pada sisi *blade* yang searah dengan arah arus lebih besar daripada sisi *blade* yang berlawanan dengan arah arus. Sehingga torsi yang bernilai positif dapat dihasilkan dan turbin dapat berputar. Turbin tipe *drag device* memiliki RPM dan efisiensi yang rendah karena *blade* tidak dapat bergerak lebih cepat daripada arus (Hantoro, 2011).

Sedangkan turbin tipe *lift device*, seperti Turbin Heliks dan Turbin Darrieus memanfaatkan *blade / foil* yang berbentuk *airfoil* untuk menghasilkan gaya *lift* / gaya angkat. Turbin tipe ini mampu mengkonversi gaya angkat *blade / foil* menjadi torsi positif (dalam bentuk putaran turbin). *Blade / foil* turbin tipe *lift device* akan bergerak lebih cepat daripada arus. Dengan demikian turbin tipe *lift device* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada *drag device* (Hantoro, 2011). Berikut ialah gaya *lift* yang terjadi pada turbin Vertikal Aksis.



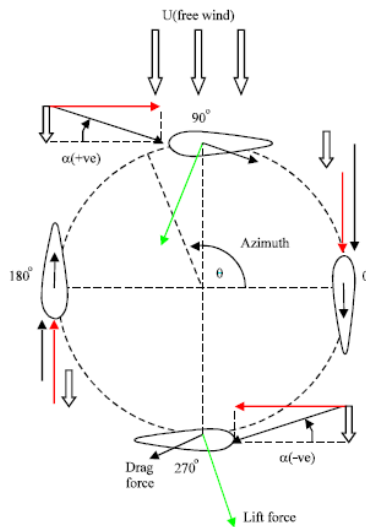
Gambar 2.4 Gaya *lift* pada Turbin Vertikal Aksis (Lazauskas, 2012)

2.3 Turbin Darrieus

Turbin angin Darrieus pada umumnya dikenal sebagai turbin eggbeater. Turbin angin Darrieus pertama kali ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1931. Turbin angin Darrieus merupakan turbin angin yang menggunakan prinsip aerodinamik dengan memanfaatkan gaya *lift* pada penampang sudut rotornya dalam mengekstrak energi angin. Turbin Darrieus memiliki torsi rotor yang rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin

angin Savonius sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Namun turbin ini membutuhkan energi awal untuk mulai berputar. Rotor turbin angin Darrieus pada umumnya memiliki variasi sudut yaitu dua atau tiga sudut. Modifikasi rotor turbin angin Darrieus disebut dengan turbin angin H.

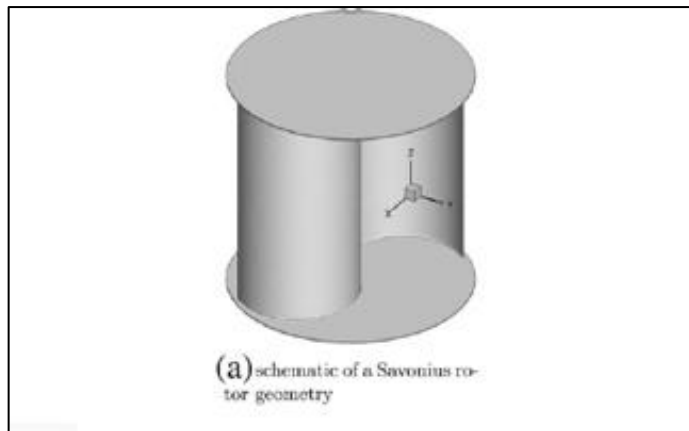
Besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus merupakan energi poros yang diperoleh turbin dari energi aliran air. Untuk mengetahui daya turbin Darrieus terlebih dahulu harus diketahui vektor gaya dan kecepatan pada hydrofoilnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.5 Turbin Darrieus (zamani 2016)

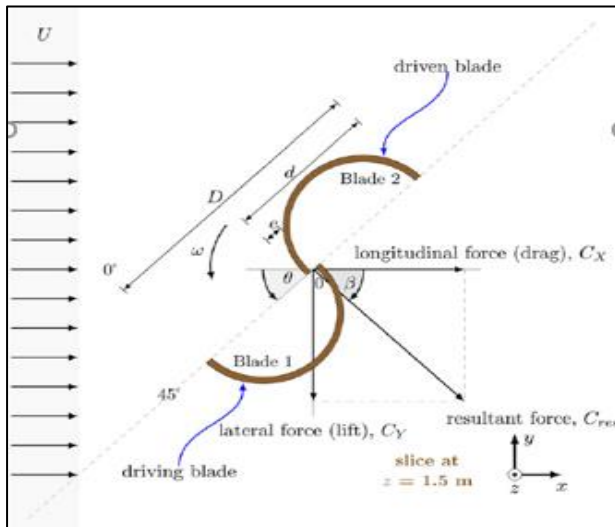
2.4 Turbin Savonius

Turbin ini ditemukan pertama kalinya di Finlandia oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius pada tahun 1922 dan berbentuk S apabila dilihat dari atas. Turbin jenis ini secara umumnya bergerak lebih perlahan dibandingkan jenis turbin angin sumbu horizontal, tetapi menghasilkan torsi yang besar. Konstruksi turbin sangat sederhana, tersusun dari dua buah sudut setengah silinder.



Gambar 2.6 Turbin Savonius (Munson, 2002)

Desain Savonius tipe S ini juga sangat sederhana dan juga dapat dirancang dengan mudah dari drum. Desain Savonius ini sedikit lebih efisien daripada tipe Savonius di atas karena beberapa aliran udara dibelokkan oleh kedua sudut lalu keluar pada salah satu sisinya. Dengan memanfaatkan gaya *drag* Savonius bergerak optimal pada kecepatan rendah sehingga sangat baik digunakan pada kecepatan – kecepatan angin rendah maupun menengah. Selain itu ada berbagai macam model Savonius seperti model S dan lain lain.



Gambar 2.7 Vektor Gaya Savonius (Munson, 2002)

2.5 Teori Betz

Berdasarkan teori Betz yang divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar menjelaskan ketidakmungkinan suatu desain turbin angin yang memiliki koefisien daya (C_p) diatas angka 59%. Hal ini dapat diartikan bahwa desain turbin angin terbaik tipe apapun tidak akan menghasilkan efisiensi rotor diatas 59%. Karena suatu turbin angin tidak akan mampu menyerap seluruh energi kinetik yang berada dalam aliran angin.

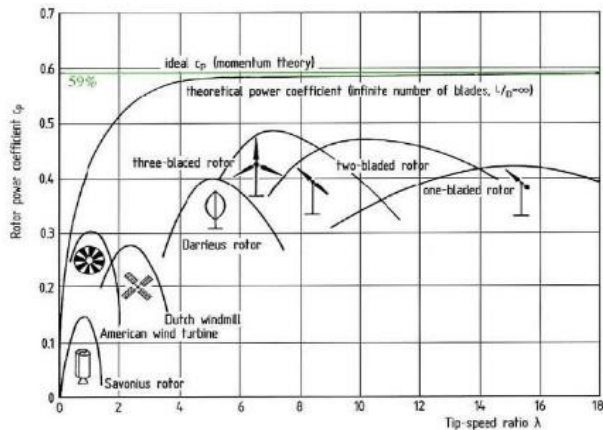
Nilai C_p untuk satu tipe turbin angin tidak selalu sama karena nilai C_p merupakan fungsi dari *tip speed ratio* (λ). Untuk mengetahui nilai C_p maksimal yang mampu dihasilkan oleh sebuah turbin angin, maka perlu diketahui nilai *tip speed ratio* yang dihasilkan.

$$\eta = C_p \times 100\% \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{P}{P_{tot}} = \frac{T}{0,5\rho A v^2} \quad (2.8)$$

Dimana :

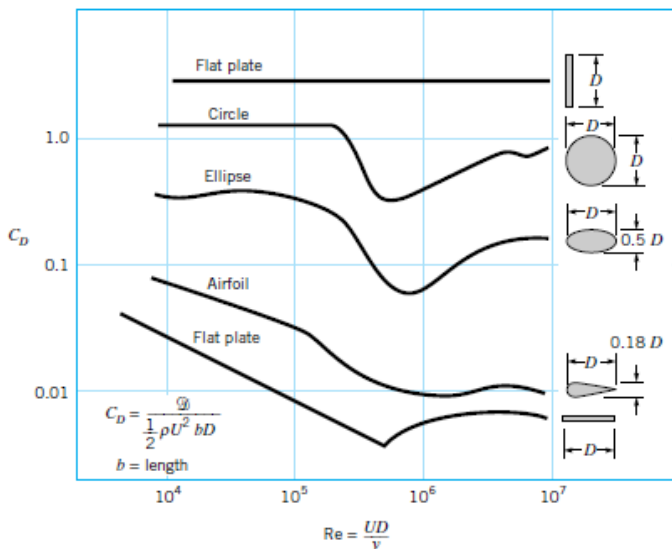
- T = Torsi Turbin (Nm)
- ω = Kecepatan Sudut Turbin (rad/s)
- ρ = Densitas Fluida (kg/m³)
- A = Area sapuan turbin (m²)
- V = Kecepatan Arus Fluida (m/s)
- P = Daya Mekanik Turbin (watt)
- P_{available} = Daya arus Fluida (watt)
- C_p = *Coefficient of Power*
- η = Efisiensi (%)



Gambar 2.8 Grafik Potensi Turbin Angin

2.6 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* atau *Reynolds Number* (Re) merupakan kuantitas non-dimensional yang merepresentasikan rasio antara gaya-gaya inersia terhadap gaya yang diakibatkan oleh viskositas fluida. Bilangan Reynolds ini dapat digunakan untuk mengidentifikasikan



Gambar 2.9 Geometri (Munson, 2002)

jenis aliran yang berbeda, seperti jenis aliran laminar dan turbulen.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Viskositas}} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.9)$$

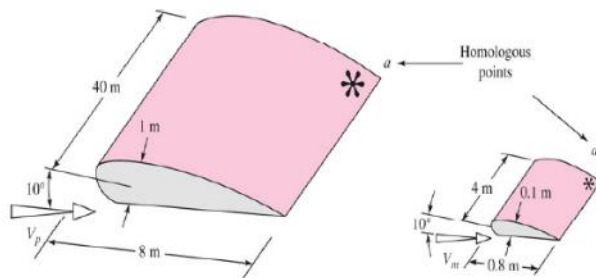
Keterangan: μ = Viskositas Fluida
 ρ = Densitas Fluida (kg/m³)
 V = Kecepatan Arus Fluida (m/s)
 ν = Viskositas Kinematik Fluida (m²/s)
 D = Diameter Turbin (m)

2.7 Kesamaan Dimensi

Kesamaan dimensi sangat berguna untuk perencanaan, memrepresentasikan, dan interpretasi sebuah eksperimen. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kompleksitas variable dari eksperimen yang diberikan oleh keadaan asli. Kesamaan dimensi dibagi menjadi tiga bagian :

2.7.1 Kesamaan Geometri

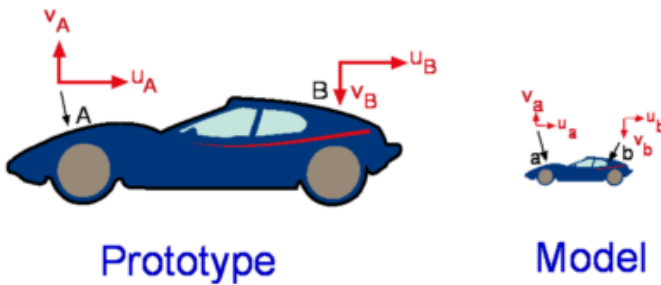
Untuk kesamaan geometrik hal yang harus diperhatikan adalah rasio dari 3 dimensi serta sudutnya. Sebuah benda memiliki panjang, lebar, tinggi, dan sudut pembentukan, perubahan dimensi harus diubah dengan perbandingan yang sama.



Gambar 2.10 Ilustrasi Kesamaan Dimensi (PSU, 2014)

2.7.2 Kesamaan Kinematik

Kesamaan kinematic rasio kecepatan yang sama disetiap titik. Model streamline juga harus sama sehingga model akan memiliki efek yang sama dengan prototipe.



Gambar 2.11 Ilustrasi Kesamaan Kinematik (PSU, 2014)

$$\left(\frac{v_A}{u_A} \right) = \left(\frac{v_a}{u_a} \right)$$

2.7.3 Kesamaan Dinamik

Dari semua yang paling membatasi kesamaan dinamik. Untuk mendapatkan kesamaan dinamik kita perlu memperhatikan non dimensional number yang terkait dengan aliran yang digunakan pada model dan prototype dengan kata lain.

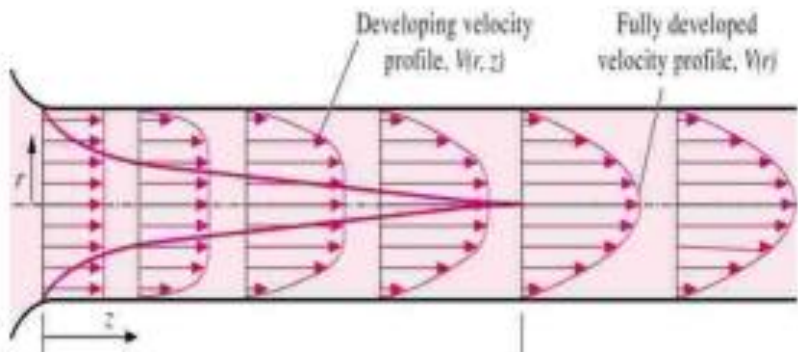
$$\Pi_{model} = \Pi_{prototype}$$

Dalam hal ini bilangan reynolds dan mach harus sama antara model dan prototipe. Ketika aliran dalam

kecepatan yang tidak terlalu tinggi (bilangan mach dibawah 0.3)maka hanya bilangan reynolds yang menjadi acuan. Namun jika lebih dari itu maka bilangan mach juga harus digunakan.

2.8 *Internal flow dan external flow*

Dalam ilmu mekanika fluida, yang dimaksud aliran internal adalah aliran dimana fluidanya dibatasi oleh suatu permukaan solid. Oleh karena itu lapisan batas tidak dapat berkembang karena dibatasi permukaan yang solid tersebut. Aliran internal didominasi oleh pengaruh viskositas pada

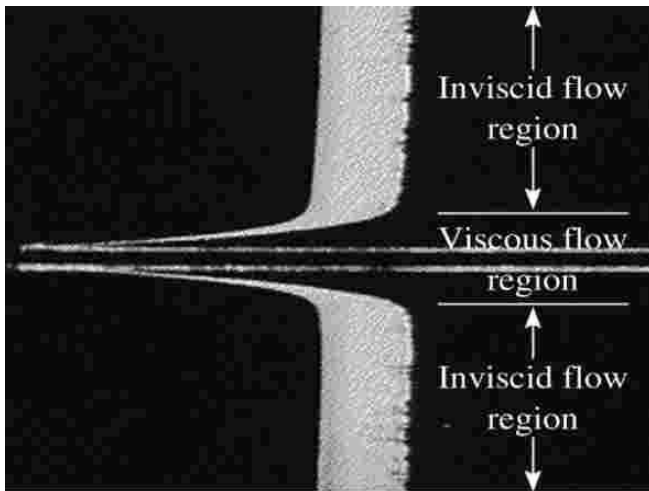


Gambar 2.12 Aliran Dalam Pipa (Cengel, 2006)

sepanjang daerah kerjanya. Sedangkan pengertian aliran eksternal adalah aliran yang mengalir pada suatu benda yang terbenam dalam suatu fluida yang tak terbatas. Dengan kata lain, fluida yang mengalir berada diluar permukaan benda-benda tersebut. Efek viscous pada aliran eksternal terbatas pada lapisan batas dan wake.

2.9 Aliran *Viscous* dan *inviscid*

Perbedaan utama dari aliran *viscous* dan *inviscid* yaitu apabila pada aliran *inviscid* nilai dari koefisien viskositas diasumsikan nol ($\mu=0$) walaupun sebenarnya fluida dengan viskositas nol tidak pernah dijumpai. Sebaliknya aliran *viscous* adalah aliran fluida yang memiliki viskositas yang ditandai dengan munculnya efek gesekan yang signifikan. Aliran tersebut biasanya dekat dengan permukaan yang padat



Gambar 2.13 Daerah aliran *inviscid* dan aliran *viscous*

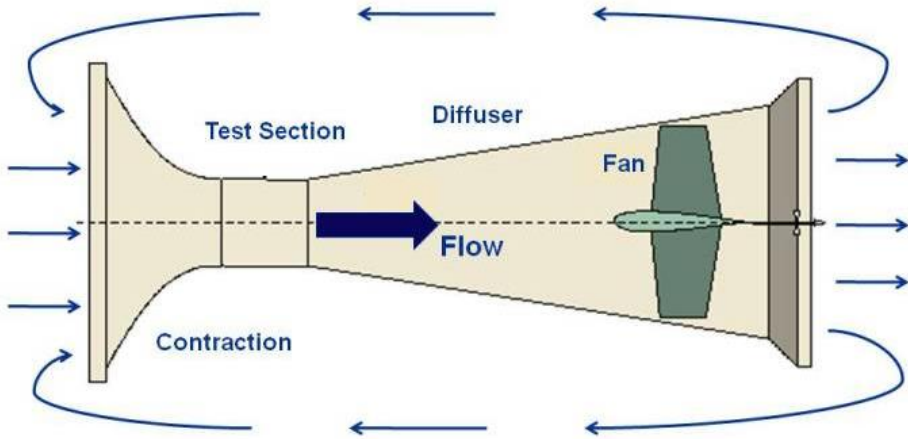
Gambar 2.4 menunjukkan daerah aliran *viscous* dan *inviscid* dimana daerah *inviscid* terlihat bahwa alirannya terpengaruh oleh gesekan yang terjadi dengan permukaan saluran yang berupa solid. Pengaruh dari viskositas yang terjadi antara fluida dengan permukaan solid dapat memperlambat kecepatan relatif dari keduanya. Permukaan solid mengalami gaya tarik yang berlawanan terhadap arah gerakan. Viskositas adalah kemampuan menahan suatu fluida terhadap deformasi, baik itu tegangan geser (*shear*) atau tegangan tarik (*tensile*)

2.10 Aliran *Compressible* dan Aliran *Incompressible*

Aliran *compressible* atau mampu mampat yaitu aliran fluida yang dicirikan dengan berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Contoh fluida termampatkan adalah: udara, gas alam, dll. Sedangkan aliran dikatakan *incompressible* atau tidak mampu mampat adalah aliran fluida yang dicirikan dengan tidak berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Contoh fluida tak-termampatkan adalah: air, berbagai jenis minyak, emulsi, dll. Indikator untuk menentukan pengaruh kompresibilitas suatu aliran dapat dilihat melalui *Mach Number* (Ma) yang didefinisikan sebagai rasio antara kecepatan aliran lokal terhadap kecepatan suara lokal. Berikut ini merupakan indikator *mach number* antara lain:

- $Ma < 0.3$: *incompressible*
- $Ma < 1$: *Subsonic*
- $Ma = 1$: *Sonic*
- $Ma > 1$: *Supersonic*
- $Ma \gg 1$: *Hypersonic*

2.11 Wind Tunnel



Gambar 2.14 *Wind tunnel* (NASA, 2004)

Wind tunnel adalah alat yang digunakan dalam penelitian dinamika fluida untuk mempelajari karakteristik aliran udara. *Wind tunnel* digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya-gaya dinamika fluida.

2.10 Blockage Effect

Blockage ratio adalah rasio dari diameter rotor turbin dengan diameter kanal (Willden & Schluntz, 2015). Pada kasus pengujian turbin pada kanal, efek dari *blockage* untuk turbin angin dan *hydrokinetik* adalah sama, baik untuk *wind tunnel* atau kanal air (Kinsey & Dumas, 2017).

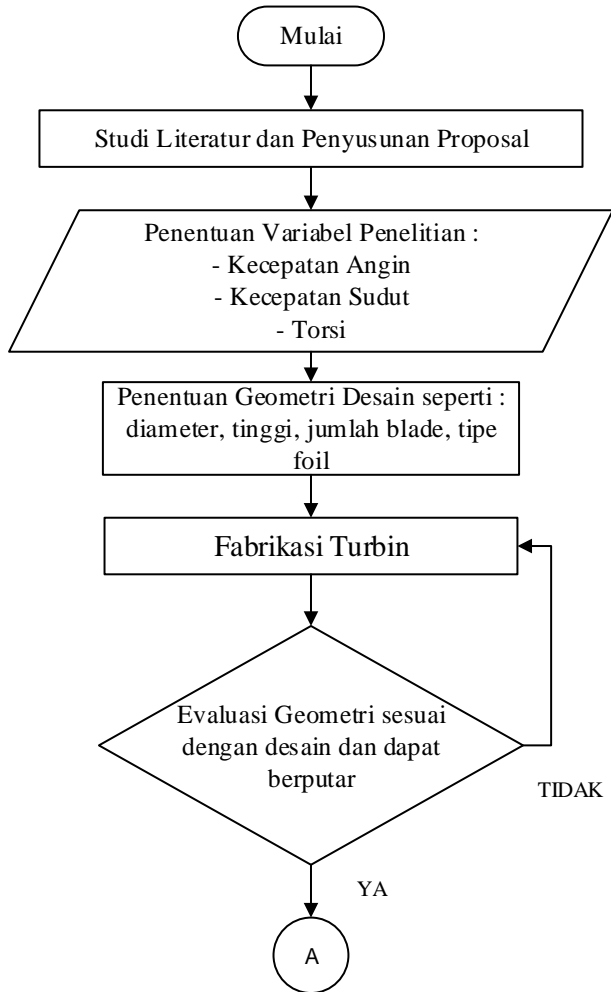
Pada pengujian turbin angin di *wind tunnel*, efek *blockage* merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis performansi turbin sumbu vertikal, dimana

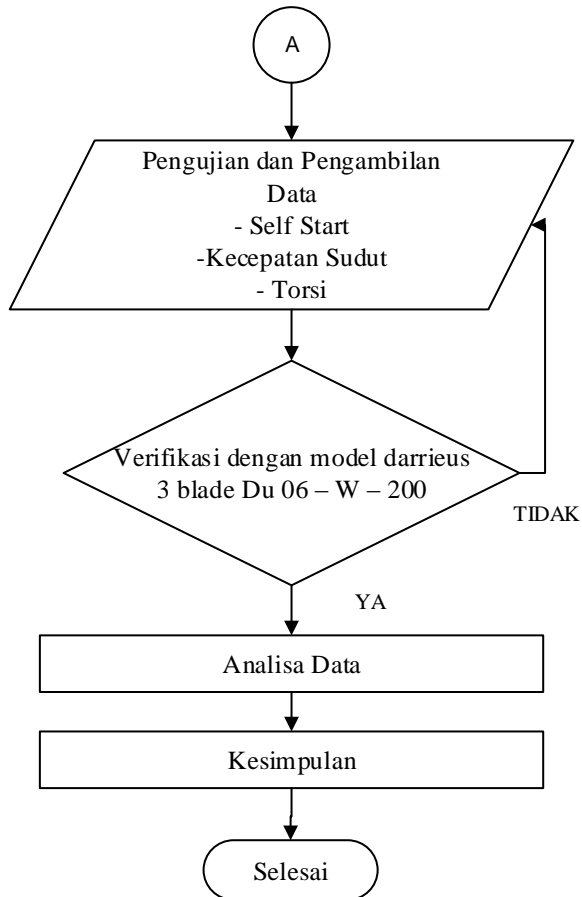
blockage akan menimbulkan efek yang buruk ketika *wind tunnel* bekerja pada kecepatan aliran yang rendah (Ross, 2010). Nilai dari *blockage* rasio harus kurang dari 7,5%. Jika nilai *blockage* rasio lebih dari 7,5% maka aliran pada sekitar model akan mengalami percepatan. Gaya aerodinamik *drag* akan timbul dan mempengaruhi aerodinamik model (Cengel & Cimbala, 2006).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tahapan pelaksanaan tugas akhir yang diwakilkan dengan diagram alir dibawah ini :





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Literatur dan Penyusunan Proposal

Pada tugas akhir ini diawali dengan melakukan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman peneliti terhadap topik penelitian yang akan diambil. Studi literatur dilakukan untuk mengetahui dan

mempelajari pengetahuan pendukung seperti mekanisme turbin angin, *wind tunnel*, dan lain-lain. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan beberapa bahan referensi berupa jurnal ilmiah terkait perkembangan penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya. Topik referensi yang terkait tersebut adalah turbin angin vertikal aksis, turbin jenis darrieus, aspek-aspek desain turbin (jumlah *blade* (n), tipe *airfoil*, dan lain-lain). Selain itu, dipelajari pula analisis parameter dan variable yang berkaitan dengan pengujian turbin seperti torsi, kecepatan sudut, daya, dan efisiensi. Hipotesa awal dilakukan setelah melakukan perbandingan dengan beberapa penelitian sebelumnya.

3.2 Penentuan Variabel

Menentukan variabel penelitian adalah tahap selanjutnya. Penentuan variabel untuk menjawab tujuan penelitian awal, untuk mencapai tujuan tersebut maka perlu didapatkan nilai efisiensi turbin dan kemampuan *self-start* turbin.

Untuk mendapatkan nilai efisiensi turbin, besaran yang perlu diketahui meliputi torsi (T) dan kecepatan sudut (ω). Dimana masing-masing variabel di atas diujikan pada variasi jenis kecepatan angin. Variasi kecepatan angin didapatkan dengan mengetahui kemampuan *output* kecepatan angin yang dapat dihasilkan pada *wind tunnel*, lalu ditentukan berapa jumlah variasi yang dibutuhkan. Variasi kecepatan angin yang akan diujikan adalah 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s.

Pada bagian 2.8 mengenai aliran eksternal dan internal dibuat pada sebuah *wind tunnel* dapat dicari titik mana sebuah angin masih dianggap seperti aliran eksternal. Pada bagian *test section* inilah model prototip turbin angin diletakkan untuk dilakukan percobaan. Diketahui, panjang yang dibutuhkan dari *entrance region* hingga *test section* adalah 100 cm. Bagian *test section* pun menggunakan

bahan dari plastik sehingga gaya gesek fluida berkurang sehingga menjadi aliran laminar yang *uniform*.



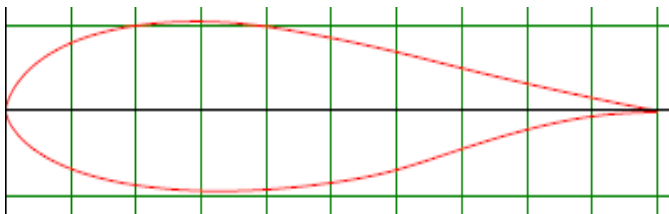
Gambar 3.2 Test Section *Wind tunnel*

3.3 Desain Geometri Turbin

Tahap penentuan geometri memiliki batasan berupa luasan test section. Pendekatan desain geometri turbin ini dilakukan dengan model *bottom-up*, yaitu dengan mengetahui ukuran geometri maksimum yang dapat diterapkan pada *wind tunnel*. Diketahui bahwa tinggi dan lebar *test section* pada *wind tunnel* adalah 30cm x 30 cm.

3.3.1 Desain Darrieus

Jenis *airfoil* dalam turbin darrieus sangat berpengaruh terhadap efisiensi turbin. Berdasarkan



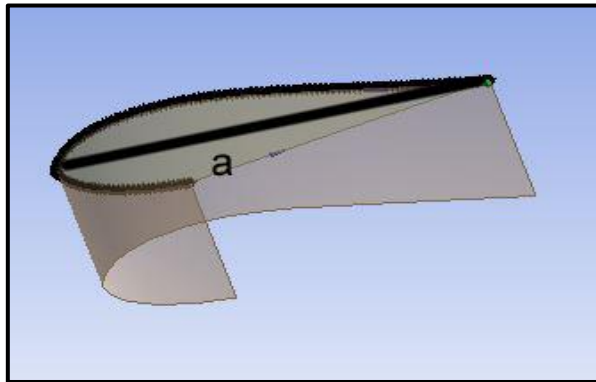
Gambar 3.3 Bentuk *airfoil* Du06w200.

studi literatur, jenis *airfoil* yang tepat digunakan untuk turbin ini adalah Du06w200. Du06w200 mempunyai efisiensi tertinggi di antara *airfoil* jenis ini lainnya

(Claessens, 2016). Selain itu, *airfoil* ini memiliki ketebalan *chord* yang lebih tebal sehingga turbin menjadi lebih kuat. Berikut merupakan gambar skematik *airfoil* Du06w200.

3.3.2 Desain J-Darrieus

Berikut adalah model modifikasi dari Darrieus Du06w200. Desain *airfoil* seperti berikut didapatkan dari Zamani. Modifikasi dilakukan untuk menimbulkan vorteks dalam celah tersebut.



Gambar 3.4 bentuk J - Du06w200 (Zamani, 2016)

3.3.3 Desain Savonius

Bentuk Savonius yang digunakan adalah S Savonius. Dengan adanya overlap angin pada rotor akan berpindah kesisi yang lain sehingga mendorong dengan gaya *drag*.

3.4 Pembuatan Rancang Bangun

Dari hasil desain geometri yang sudah ditentukan, maka dapat dilakukan pembuatan turbin Darrieus-Savonius. Bahan yang digunakan untuk turbin Darrieus adalah PVC (*Polyvinyl Chloride*), sedangkan untuk turbin Savonius adalah pelat Aluminium. Digunakannya bahan-

bahan tersebut dikarenakan ketersediaan bahan dan kemudahan fabrikasi.

Tabel 3.1 Parameter Turbin

Parameter	Keterangan
Tipe <i>airfoil</i>	Du06w200
Panjang turbin (h)	20 cm
Diameter (D)	15 cm
Chord (c)	2,7 cm
Jumlah <i>blade</i> (n)	2 - 4

3.5 Pengujian dan Pengambilan Data

Eksperimen turbin J – Darrieus dilakukan pada alat *wind tunnel*. Dengan menentukan *set-point* berupa frekuensi putaran dari *fan* pada nilai tertentu, maka dari frekuensi bisa dikonversi menjadi nilai angin didapatkan nilai kecepatan angin. Nilai kecepatan angin didapatkan dengan menggunakan alat ukur Anemometer. Nilai yang ditetapkan pada *wind tunnel* ditentukan berdasarkan variasi yang telah ditentukan pada penentuan variabel penelitian (tabel 3.1).



Gambar 3.5 Anemometer

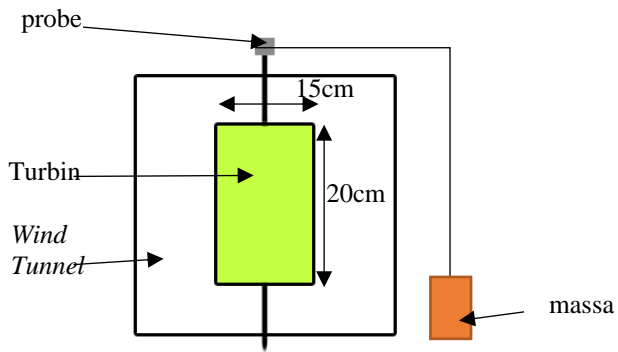
Setelah mendapatkan nilai kecepatan angin, eksperimen dilakukan dengan meletakkan turbin pada *wind tunnel*. Pada pengambilan data tahap 1, dilakukan pengambilan data kecepatan putar turbin dengan menggunakan alat Tachometer. Alat ini akan membaca kecepatan sudut turbin dalam satuan RPM (*rotation per minute*). Pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali pada masing-masing variasi kecepatan angin dan jenis turbin. Tachometer diletakkan bersentuhan dengan bagian *probe* atau konektor yang terdapat pada bagian atas turbin.



Gambar 3.6 Tachometer

Selanjutnya, pengambilan data tahap kedua adalah pengambilan data massa beban. Nilai massa beban ini dijadikan sebagai dasar perhitungan nilai gaya, yang kemudian didapatkan nilai Torsi. Pengambilan data massa beban ini dilakukan pada masing-masing variasi kecepatan angin dan jenis turbin pada variasi sudut azimuth (0° , 120° , 240°). Probe diikat pada sebuah benda bermassa, dimana massa benda tersebut dapat berubah-ubah. Dalam hal ini, benda bermassa tersebut adalah bejana berisi air, dimana

berat air tersebut disesuaikan hingga turbin berhenti berputar.



Gambar 3.7 Ilustrasi Pengambilan Data

BAB IV

ANALISA DATA dan PEMBAHASAN

Setelah dilakukan eksperimental dengan menggunakan *wind tunnel* didapatkan hasil uji *self start*, kecepatan sudut, torsi dan efisiensi untuk model J-Darrieus *blade* dengan verifikasi menggunakan Darrieus dan Savonius. Data – data tersebut dicari untuk melihat merepresentasikan kondisi nyata yang dimodelkan dalam *wind tunnel*. Berikut adalah hasil dari eksperimen yang telah dilakukan :

4.1 Hasil Uji *Self Start*

Uji *self start* dilakukan untuk mengetahui potensi kecepatan angin minimum yang dapat memutar turbin. Kecepatan yang digunakan adalah kecepatan angin pada *wind tunnel*. Setelah melakukan uji *self start* didapatkan hasil kecepatan sebagai berikut :

Tabel 4.1 Uji *Self start*

<i>Self start</i>	
Konfigurasi Turbin	U (m/s)
J - Darrieus 2 <i>Blade</i>	3,552
J - Darrieus 3 <i>Blade</i>	2,514
J - Darrieus 4 <i>Blade</i>	2,438
Darrieus 3 <i>Blade</i>	3,038
Savonius 3 <i>Blade</i>	1,333

Dari data uji diatas didapatkan setelah mengubah kecepatan angin yang terkecil hingga turbin berputar. Pada tabel 4.1 terlihat jelas bahwa Savonius dengan 3 *blade* memiliki *self start* terbaik. Hal ini disebabkan gaya yang dominan pada Savonius adalah gaya *drag* dan dengan *solidity* yang tinggi maka angin semakin baik dikonversi menjadi gerak. Modifikasi J – darrieus 3 *blade* mampu meningkatkan *self start* dengan mendapatkan 2,514 m/s,

sedangkan Darrieus 3 *blade* yang biasa mendapat nilai kecepatan awal 3,038 m/s. Kecepatan awal lebih tinggi didapatkan karena adanya pusaran angin atau vorteks didalam model J – Darrieus *blade* (Zamani, 2016). Adanya pusaran terjadi sama dengan yang terjadi pada Savonius walaupun tidak lebih baik dari Savonius namun peningkatan namun peningkatan yang terjadi dibanding bentuk asli cukup signifikan. Penambahan jumlah *blade* pada turbin dapat pula meningkatkan *self start*. Karena ketika terjadi penambahan *blade* maka banyak pusaran yang memasuki masing – masing *blade* semakin banyak sehingga gaya *drag* yang dihasilkan pun semakin besar pula. Kenaikan performa *self start* terjadi karena bentuk J turbin mampu mengurangi tekanan dari bagian paling tebal *airfoil* hingga *trailing edge*

4.1.1 Analisa Perubahan Bentuk

Perubahan bentuk yang dilakukan pada J turbin dapat meningkatkan *self start* dari model yang biasa. Peningkatan yang dapat dilakukan juga cukup signifikan yaitu 20 persen lebih. Hal ini bisa dijadikan pertimbangan jika angin yang dimiliki memiliki variasi dari jenis angin kecil hingga besar.

Tabel 4.2 Persentase pengaruh perubahan bentuk

Konfigurasi Turbin	U (m/s)	Persentase
Darrieus 3 <i>Blade</i>	3,038	0
J - Darrieus 3 <i>Blade</i>	2,514	20,843
Savonius 3 <i>Blade</i>	1,333	128,423

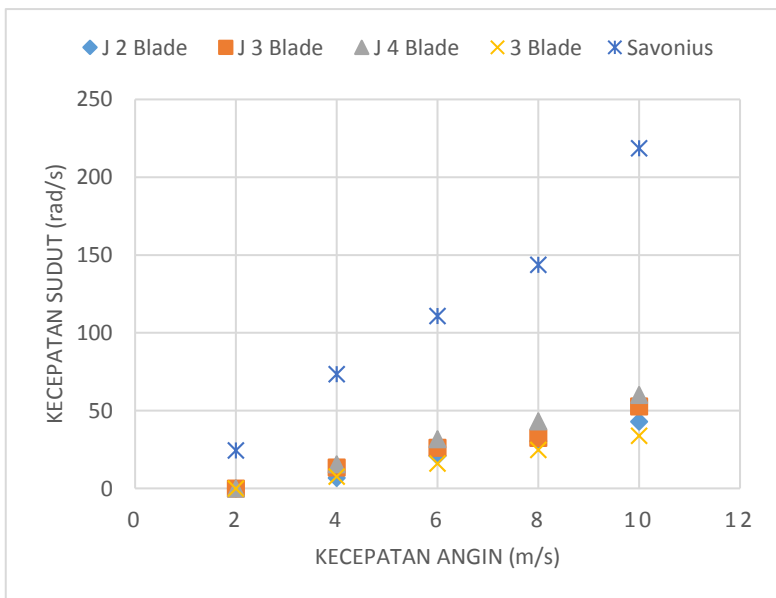
4.1.2 Analisa perubahan jumlah *blade*

Blade darrieus diubah karena melihat penelitian (Danang, 2016) dan (Claessens, 2016) ada keuntungan yang dapat diperoleh. Pada tabel 4.1 Terlihat adanya peningkatan pada penambahan jumlah menjadi penambahan menjadi 4 *blade*

Tabel 4.3 Persentase pengaruh perubahan jumlah *blade*

Konfigurasi Turbin	U (m/s)	Persentase
J - Darrieus 2 <i>Blade</i>	3,552	-29,222
J - Darrieus 3 <i>Blade</i>	2,514	0
J - Darrieus 4 <i>Blade</i>	2,438	3,117

4.2 Analisa Uji Kecepatan Sudut

**Gambar 4.1** Grafik Uji Kecepatan Sudut

Uji kecepatan sudut dilakukan guna melihat potensi dari putaran yang bisa dilakukan turbin. Variasi angin meningkatkan jumlah putaran turbin itu sendiri seperti terlihat pada tabel dibawah. Terlihat ada peningkatan nilai kecepatan sudut terhadap kecepatan angin pada tiap turbin. Turbin Savonius pada tiap kecepatan

memiliki nilai tertinggi karena kemampuan ekstraksi angin yang baik dari model Savonius itu sendiri. Dari grafik kecepatan sudut diatas terlihat jelas perbandingan kecepatan sudut pada tiap kecepatan. Perbedaan model darrieus terbesar terlihat pada bentuk J 3 blade dan darrieus 3 blade.

Tabel 4.4 Data Kecepatan Sudut

Konfigurasi Turbin	ω (rad/s)				
	2	4	6	8	10
J 2 Blade	0	6.80	21.05	30.37	43.01
J 3 Blade	0	13.55	26.14	32.57	52.73
J 4 Blade	0	15.48	31.69	43.06	60.02
3 Blade	0	7.58	16.02	24.84	33.82
Savonius	24.44	73.39	110.91	143.71	218.65

4.2.1 Analisa kecepatan sudut terhadap Perubahan Bentuk



Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Sudut terhadap perubahan bentuk

Dengan adanya perubahan cekungan pada model darrieus dapat meningkatkan kecepatan sudut. Jika dilihat pada tabel 4.5 Peningkatan yang dihasilkan rata – rata mencapai lebih dari 34 persen dan pada gambar 4.2 Semakin tinggi kecepatan dari *wind tunnel* semakin besar pula perbedaan nilai kecepatan sudut antara J-Darrieus 3 *Blade* dan Darrieus 3 *Blade*.

Tabel 4.5 Perbandingan Kecepatan Sudut pada Perubahan bentuk

Konfigurasi Turbin	ω (rad/s)					Persentase
	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8m/s	10 m/s	
J 3 <i>Blade</i>	0	13.55	26.14	32.57	52.737	0
3 <i>Blade</i>	0	7.582	16.02	24.84	33.824	-34.182
Savonius	24.4	73.39	110.9	143.7	218.65	356.886

4.2.2 Analisa perubahan Jumlah *blade*

Dalam bagian ini akan dilihat kecepatan sudut turbin jika divariasikan jumlah *bladenya*. Pada grafik 4. Terlihat J-Darrieus 3 *blade* meningkat cukup linier ketimbang 2 *blade* maupun 4 *blade*. Namun pada 4 *blade* memiliki kecepatan sudut paling tinggi disetiap kecepatan angin. Konfigurasi 4 *blade* mampu mengekstrasi angin lebih baik sehingga turbin dapat berputar lebih cepat.

Terjadi peningkatan 19% jika ditingkatkan menjadi J-Darrieus 4 *blade*. Kecepatan sudut tertinggi pun ada pada kecepatan 10 m/s untuk J-Darrieus 4 *blade* dengan nilai 60,025 rad/s. Disini terbukti variasi

dengan 4 *blade* bisa mengekstraksi angin terbaik untuk membantu turbin berputar.



Gambar 4.3 Grafik Kecepatan Sudut terhadap perubahan bentuk

Tabel 4.6 Perbandingan Kecepatan Sudut pada Perubahan Jumlah *Blade*

Konfigurasi Turbin	ω (rad/s)					Persentase
	2	4	6	8	10	
J 2 Blade	0	6.81	21.05	30.37	43.01	-19.01
J 3 Blade	0	13.55	26.14	32.57	52.73	0
J 4 Blade	0	15.48	31.69	43.06	60.02	20.21

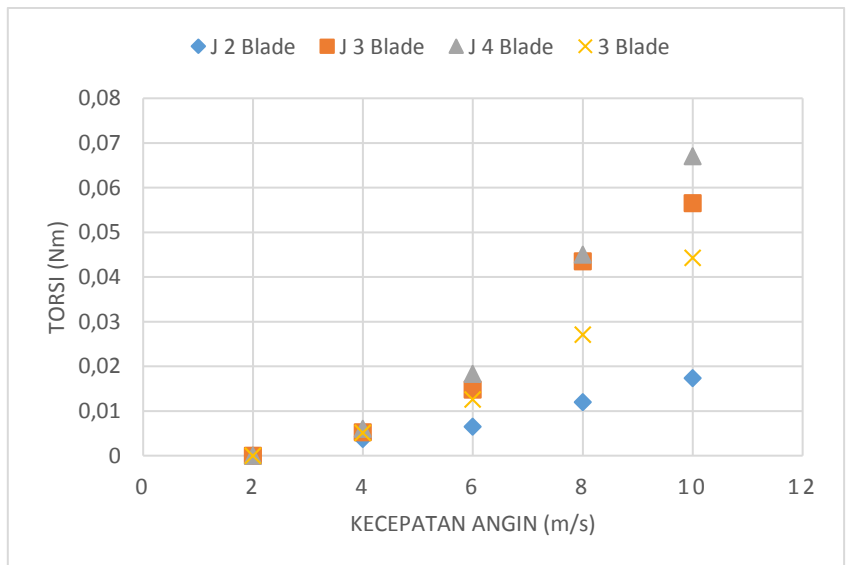
4.3 Analisa Torsi

Turbin nantinya akan memutar dinamo sehingga membutuhkan torsi yang besar. Pada uji torsi kali ini menggunakan 3 azimuth yang kemudian di rata – rata, torsi

tersebut. Pada grafik 4.4 Torsi J-Darrieus 4 *blade* terlihat sangat signifikan terutama pada perubahan kecepatan dari 6 m/s menjadi 8 m/s. Pada tipe darrieus torsi terbesar terdapat pada J-Darrieus 4 *blade*

Tabel 4.7 Data Torsi

Konfigurasi Turbin	2m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s
J 2 <i>Blade</i>	0	0.004	0.007	0.012	0.017
J 3 <i>Blade</i>	0	0.005	0.015	0.044	0.057
J 4 <i>Blade</i>	0	0.006	0.018	0.045	0.067
3 <i>Blade</i>	0	0.005	0.013	0.027	0.044
Savonius	0.006	0.033	0.085	0.119	0.123



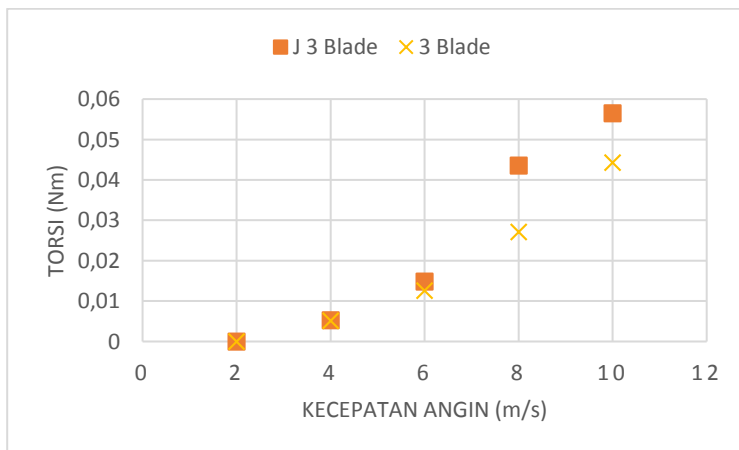
Gambar 4.4 Grafik Torsi Turbin

Dengan nilai 0,067 Nm terpaut hanya sedikit dari J-Darrieus 3 *Blade*. Gaya *drag* pada bentuk J terlihat mampu meningkatkan torsi pada kecepatan

rendah. Peningkatan nilai solidity mampu memperbesar torsi, karena adanya peningkatan massa pada turbin sehingga menambah gaya dorong (Qing'an Li, 2016). Namun pada darrieus jumlahnya tidak bisa terlalu banyak karena efek yang dihasilkan akan seperti silinder dan gaya pada *airfoil* berkurang akibat angin tidak dapat mengalir dengan baik pada *angle of attack* yang diinginkan.

4.3.1 Analisa Torsi perubahan Bentuk

Modifikasi bentuk yang digunakan untuk menambah gaya *drag* pada turbin dan terlihat mampu meningkatkan torsi. Terlihat pada grafik 4.5 Pada kecepatan 8m/s perbedaan keduanya sangat jauh. Perubahan bentuk J menghasilkan efek pusaran angin yang dimiliki oleh Savonius, sehingga darrieus 3 *blade* yang umumnya membutuhkan kecepatan tinggi untuk menghasilkan gaya dapat dibantu oleh pusaran angin dalam menghasilkan gaya.



Gambar 4.5 Grafik Torsi terhadap perubahan bentuk

Jika dibandingkan dengan darrieus yang telah mengalami perubahan bentuk terjadi peningkatan sekitar 25%. Peningkatan sebesar 25% cukup besar jika melihat kecepatan yang digunakan masih dalam tahapan rendah.

Tabel 4.8 Perbandingan Torsi Terhadap Perubahan Bentuk

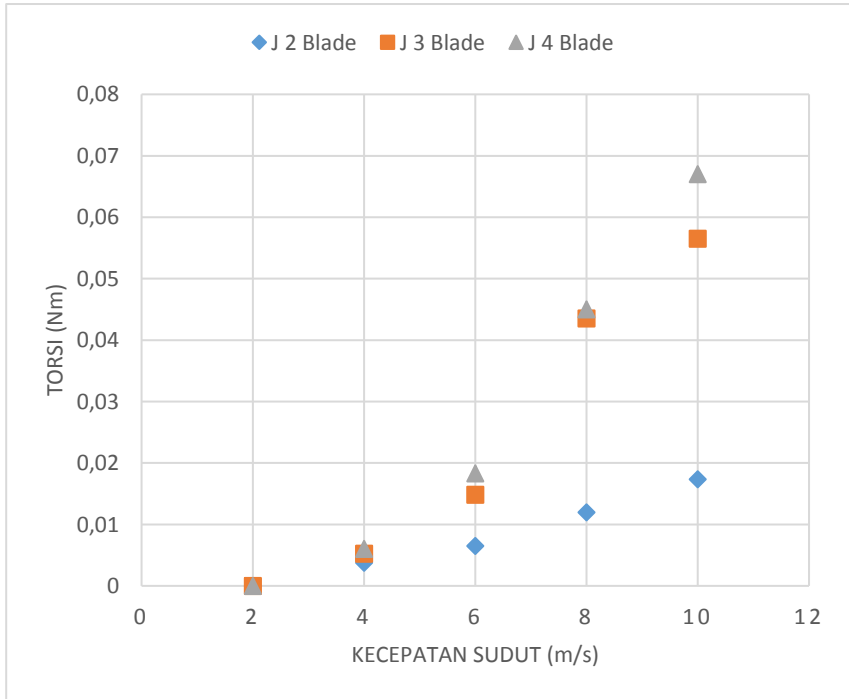
Konfigurasi Turbin	2m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s	persentase
J 3 <i>Blade</i>	0	0.005	0.015	0.044	0.057	0
3 <i>Blade</i>	0	0.005	0.013	0.027	0.044	-25.866
Savonius	0.006	0.033	0.085	0.119	0.123	204.467

4.3.2 Analisa perubahan Jumlah *blade*

Perubahan jumlah *blade* pada torsi sedikit berbeda dengan kecepatan sudut dan *self start*. Pada uji torsi variasi 3 J *blade* mendapatkan nilai yang lebih besar daripada 4 J *blade*. Hal ini terjadi karena 4 *blade* memiliki torsi yang lebih buruk pada beberapa azimuth sehingga nilai yang dihasilkan menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan variasi 3 J *blade*.

Tabel 4.9 Perbandingan Torsi Terhadap perubahan Jumlah *Blade*

Konfigurasi Turbin	2m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s	persentase
J 2 <i>Blade</i>	0	0.004	0.007	0.012	0.017	-67.011
J 3 <i>Blade</i>	0	0.005	0.015	0.044	0.057	0
J 4 <i>Blade</i>	0	0.006	0.018	0.045	0.067	13.514



Gambar 4.6 Grafik Torsi terhadap perubahan Jumlah *blade*

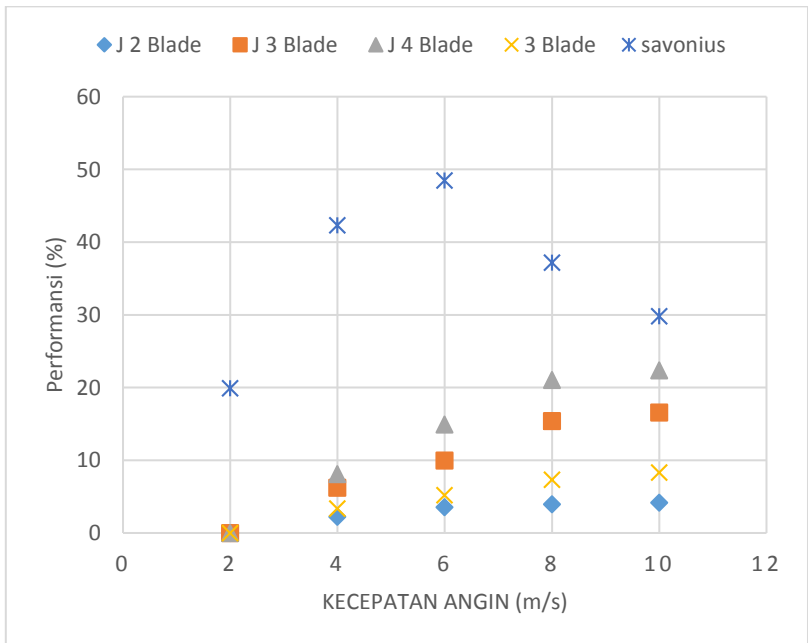
Namun jika dirata – rata selisih tiap turbin, turbin 4 j *blade* masih memiliki nilai yang lebih baik. Terlihat terdapat rata – rata 13 persen perbedaan antara 3 dan 4 J *blade*. Sehingga 4 J *blade* masih lebih baik jika dilihat secara menyeluruh.

4.4 Analisa Performansi Turbin

Efisiensi darrieus terbilang kecil jika dibandingkan dengan Savonius pada kecepatan rendah. Terlihat pada grafik nilai turbin Savonius jauh diatas darrieus.

Tabel 4.10 Data Performansi

Konfigurasi Turbin	2	4	6	8	10
<i>J 2 Blade</i>	0	2.238	3.527	3.946	4.149
<i>J 3 Blade</i>	0	6.204	9.971	15.386	16.561
<i>J 4 Blade</i>	0	8.096	14.92	21.042	22.356
<i>3 Blade</i>	0	3.373	5.182	7.305	8.320
Savonius	19.904	42.294	48.483	37.187	29.79

**Gambar 4.7** Grafik Performansi

Efisiensi pada turbin darrieus tertinggi didapat J-Darrieus 4 *blade* dengan 22 % pada kecepatan 10 m/s. Walaupun angka ini terbilang kecil dibandingkan

dengan Savonius tapi masih lebih baik dibanding dengan darrieus 3 *blade*. Daya yang dikeluarkan oleh turbin J-Darrieus

4.5 Pembahasan

Grafik yang telah didapatkan merupakan representasi dari keadaan nyata yang ada di Indonesia dengan kecepatan angin rendah dan menengah. Perubahan bentuk yang didasari oleh (Zamani, 2016) dan jumlah yang dilakukan (Claessens, 2016) menunjukkan parameter terbaik untuk sebuah turbin vertikal. Model J-Darrieus 3 *blade* yang diuji sesuai dengan simulasi, pada eksperimen peningkatan terlihat lebih baik di tiap uji dengan perbedaan setidaknya lebih dari 20% bahkan pada uji kecepatan sudut peningkatan mencapai 36%.

Dengan perubahan bentuk menjadi J-Darrieus *Blade* turbin vertikal mampu berputar dengan tambahan gaya yaitu gaya *drag* dengan adanya cekungan. Ekstraksi angin menjadi lebih baik dengan rata – rata peningkatan sebesar 34%. J-Darrieus 3 *blade* bisa dikatakan lebih baik ketimbang Darrieus 3 *blade* jika dilihat dari setiap aspek yang diujikan.

Selain perubahan bentuk ada pula perubahan jumlah *blade* untuk melihat efek yang dihasilkan. Dengan bentuk *airfoil* yang sama J-Darrieus di variasikan menjadi 2 dan 4 *blade*, hal ini berimbas pada solidity atau luasan yang dilewati oleh turbin. Menurut (Danang, 2016) pada aspek ratio yang sama namun solidity diubah maka efeknya akan berubah, terlihat pada tabel 4.3 yang menunjukkan bahwa nilai J-Darrieus 4 *blade* memiliki nilai 2% lebih baik pada *self start*. Perubahan yang signifikan terlihat pada tabel 4.6 uji kecepatan sudut terhadap dengan 16% peningkatan. Hal ini sesuai dengan (Claessens, 2016) dimana perubahan menjadi 4 *blade* pada turbin darrieus dapat meningkatkan performa. Turunnya nilai efisiensi dari Savonius akibat dari berkurangnya kemampuan ekstraksi angin pada kecepatan angin yang lebih tinggi, sehingga jika darrieus semakin

meningkat sedangkan Savonius hanya hingga kecepatan angin 6m/s efisiensi meningkat.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uji yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Bentuk turbin angin vertikal pada *wind tunnel* ditentukan dengan *dimensional similarity*. Dengan perbandingan bentuk antara real dan model, 1:0,37, guna mendapatkan efek yang sama dengan real.
2. Modifikasi bentuk NACA 0018 yaitu bentuk J Du06w200. diuji dalam 2 hal perubahan bentuk dan jumlah *blade*. Pada perbandingan dengan bentuk awal Du06w200. maka bentuk J lebih baik dalam tiap parameter penilaian yaitu *self start*, kecepatan sudut, torsi dan Cp. Dibanding bentuk awal sebelumnya Du06w200. terjadi peningkatan lebih dari 20 % dari hasil pengukuran. jumlah 4 *blade* merupakan yang paling baik diantara Darrieus lainnya. Hal ini karena jumlah tersebut lebih optimal dalam memanfaatkan angin baik dalam gaya *drag* dan gaya *lift*

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan oleh penulis untuk penelitian lebih lanjut sebagai berikut :

1. Pada pengukuran torsi menggunakan *torque wrench* kecil agar pembacaan lebih akurat dan presisi. Karena torsi sangat penting dalam menentukan potensi turbin.
2. Melakukan uji simulasi menggunakan software guna mengetahui efek aerodinamik yang terjadi dalam turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- Mahdi Zamani, dkk. 2016. "*Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine*". University of Mashhad.
- Danang. Muhammad 2016. "Studi eksperimental kinerja turbin angin vertikal aksis jenis darrieus – Savonius menggunakan *wind tunnel*". Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mahdi Zamani. Eltawil, dkk. 2016. "*Starting torque improvement using J-shaped traight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation*". University of Mashad.
- Qing'an Li, dkk. 2016. "*Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel experiments (depending on number of blades)*". Mie University.
- GWEC, 2014. "*Global Wind Energy Outlook 2014, Global Wind*" Energy Council.
- ESDM, 2014. "Potensi dan Peluang Investasi Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konversi Energi.". Kementrian ESDM
- I Paraschivoiu, 2002. "*Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*", Canada: Polytechnic International Press,
- Z. Ahmed F dan B. Ramesh, 2011. "*Handbook of Renewable Energy Technology*", Singapore: World Scientific.
- V. d. R. Aldo, 2009. "*Fundamentals Of Renewable Energy Processes*", London: Academic Press.
- M. C. Claessens, 2016 "*The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbine*", Delft University of Technology, Delft.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Fluid Mechanic : Fundamentals and Applications*. New York: Mc Graw Hill.

- Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H., Okiishi.
2002. Fundamental of Fluids Mechanic 2nd edition.
Canada : John Wiley & son, Inc.
- Hantoro, R., et al, 2011. "An Experimental Investigation of
Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current
Turbine", ITB J.Eng.Sci., 43:27-40.

LAMPIRAN A

GEOMETRI TURBIN



LAMPIRAN B

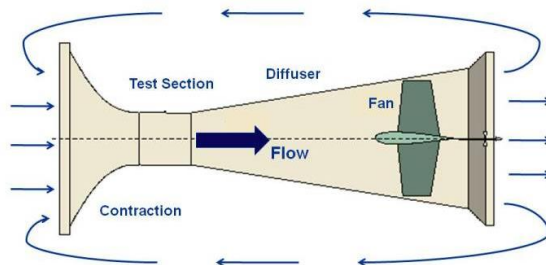
PERHITUNGAN REYNOLD NUMBER

Real			Experiment		
D (m)	u (m/s)	Re	Re	d (m)	u (m/s)
0.405	0.5	12,911.29	12,911.29	0.15	1.35
0.405	1	25,822.59	25,822.59	0.15	2.7
0.405	1.5	38,733.88	38,733.88	0.15	4.05
0.405	2	51,645.18	51,645.18	0.15	5.4
0.405	2.5	64,556.47	64,556.47	0.15	6.75
0.405	3	77,467.77	77,467.77	0.15	8.1
0.405	3.5	90,379.06	90,379.06	0.15	9.45
0.405	4	103,290.36	103,290.36	0.15	10.8
0.405	4.5	116,201.65	116,201.65	0.15	12.15
0.405	5	129,112.95	129,112.95	0.15	13.5

LAMPIRAN C

WIND TUNNEL

Wind tunnel merupakan alat yang digunakan untuk mensimulasikan keadaan sebenarnya pada suatu benda yang berada dalam pengaruh gaya aerodinamik secara eksperimental. Dalam kasus tugas akhir ini, dilakukan uji eksperimen terhadap turbin angin. Angin yang digunakan sebagai media pada percobaan ini dilewatkan pada bagian *honeycomb* sebagai input dari percobaan, dimana fungsinya adalah menghilangkan turbulensi pada angin. Kemudian angin dilewatkan pada *contraction*, dimana fungsinya adalah pengkondisian aliran angin agar ketika angin memasuki *test section*, aliran angin bersifat *uniform*. *Test section* merupakan tempat prototip diletakkan untuk diujikan. Pada bagian ini, dapat dilakukan uji eksperimen terhadap beberapa aspek, seperti pada kasus tugas akhir ini, yaitu torsi dan kecepatan putar turbin. Pada bagian *test section* ini, aliran angin sudah bersifat *uniform*. Setelah melewati *test section*, angin dihisap keluar oleh *exhaust fan* melalui *diffuser*. Putaran *exhaust fan* sebagai input dari percobaan ini dapat dikondisikan sesuai dengan besar kecepatan angin yang dibutuhkan.



LAMPIRAN C

WIND TUNNEL LABORATORIUM REKAYASA ENERGI



Specification :

- Contraction and Diffuser: precision glass fibre mouldings
- Test Section: clear acrylic, which retracts to permit access to the models.
- Adjustment of models can be made with the tunnel in operation.
- Fan: Variable speed motor driven unit downstream of the working section permitting stepless control of airspeed between 0 and 26ms⁻¹
- Balance: Lift and drag Lift- 7.0N, Drag- 2.5N, Sensitivity $\pm 0.01\text{N}$
- Air speed: Indicated on inclined manometer directly calibrated in m/s
- Suitable for undergraduate and simple research work.
- Working section: 304mm wide x 304mm high x 457mm long (octagonal cross- section)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Jakarta pada tanggal 22 Maret 1995. Meski lahir di Jakarta, penulis berpindah domisili ke Bekasi, Jawa Barat. Tamat SD PABI (2007), SMP Negeri 16 Bekasi (2010), dan lulus SMA Negeri 5 Bekasi (2013). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut

Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis mendapat kesempatan studi ke luar negeri melalui program Erasmus Mundus ke Aristotle University of Thessaloniki di Thessaloniki, Yunani mengambil Departemen Teknik Mesin. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Pengukuran Fisis dan mengikuti/menjuarai beberapa kompetisi LKTI seperti GEMASTIK. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. TPC Indo Plastic and Chemical Gresik. Pada program *internship* tersebut, penulis melakukan analisis tuning PID level control pada sistem boiler fire tube. Korespondensi dengan penulis dapat dilakukan pada email natsirhp@gmail.com.